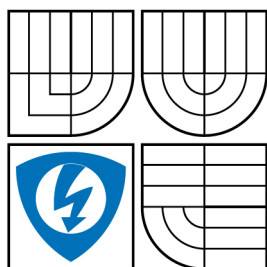


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY**

POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ SMĚSNÝCH VZTAHŮ SLOŽENÝCH SOUSTAV

COMPUTER MODELLING OF MIXTURE FORMULAS OF COMPOSITE MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

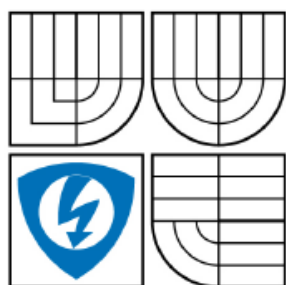
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jiří Matoušek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Zdenka Rozsivalová

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Matoušek Jiří
Ročník: 3

ID: 77830
Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Počítačové modelování směsných vztahů složených soustav

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou složených materiálů a prostudujte jejich základní vlastnosti. Vytvořte přehled směsných vztahů používaných pro výpočet relativní permitivity složené soustavy. V libovolném programovacím jazyce vytvořte aplikaci umožňující, na základě vstupních souborů hodnot a parametrů směsného vztahu, modelovat průběhy grafických závislostí relativní permitivity dvousložkové složené soustavy v širokém frekvenčním rozsahu. Respektujte požadavek, aby aplikace byla spustitelná na libovolném počítači bez nutnosti počáteční instalace a využitelná ve výuce předmětů zaměřených na elektrotechnické materiály. Teoreticky získané průběhy relativní permitivity odvozené ze směsných vztahů ověřte na praktickém příkladu složené soustavy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Zdenka Rozsívalová

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jiří Matoušek
Bytem: Felixova 1724/10, 56002, Česká Třebová
Narozen/a (datum a místo): 27.2.1986, Ústí nad Orlicí

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
doc. Ing. Jiří Kazzele, Csc.
(dále jen „nabyvatel“)

Článek 1
Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
- ☐ disertační práce
 - ☐ diplomová práce
 - ☐ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Počítačové modelování směsných vztahů složených soustav

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Zdenka Rozsivalová

Ústav: Ústav elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP: 12. 6. 2008

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☐ tištěné formě – počet exemplářů 2
- ☐ elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Předkládaná práce se zabývá modelováním průběhů dielektrických veličin a aplikací směsných vztahů pro řešení složených soustav v závislosti na frekvenci. Teoretická část se zabývá fyzikou dielektrik, charakteristikou a popisem složených soustav; její součástí je přehled základních směsných vztahů. Součástí práce je program, využitelný při výuce, umožňující modelování průběhů permitivity, ztrátového činitele a ztrátového čísla v závislosti na frekvenci a Coleho-Coleho diagramu materiálu; u směsí potom simulaci Maxwellova, Böttcherova a Lichteneckera směsného vztahu.

Abstract:

Submitted work engage in modelling of progressions of dielectric variables and application of mixture formulas for solution of composite materials in dependency on frequency. Theoretical part engage in theory of dielectric materials, composite materials and contains summary of basic mixture formulas. A part of work is programm which can be used in education. It allows modelling of permittivity, loss factor and loss number in dependency on frequency and Cole-Cole circle diagram in materials. In mixtures modelling of Maxwell's, Böttcher's and Lichtenecker's mixture formulas.

Klíčová slova:

Dielektrika, permitivita, složené soustavy, směsné vztahy, Maxwell, Lichtenecker, Böttcher

Keywords:

Dielectrics, permittivity, composite materials, mixture formulas, Maxwell, Lichtenecker, Böttcher

Bibliografická citace díla:

MATOUŠEK, J. *Počítačové modelování směsných vztahů složených soustav*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdenka Rozsivalová.

Prohlášení:

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Počítačové modelování směsných vztahů složených soustav jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. května 2008

.....
podpis autora

Poděkování:

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Zdence Rozsivalové a Ing. Martinu Frkovi, Ph. D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 29. května 2008

.....
podpis autora

Obsah

Úvod.....	9
1 Teoretická část.....	10
1.1 Fyzika dielektrik.....	10
1.1.1 Základní pojmy.....	10
1.1.2 Polarizace.....	11
1.1.3 Elektrická vodivost.....	13
1.1.4 Dielektrické ztráty.....	14
1.1.5 Permitivita dielektrik.....	16
1.2 Složené soustavy.....	19
1.2.1 Teorie složené soustavy.....	19
1.2.2 Permitivita složené soustavy.....	20
1.2.3 Směsné vztahy.....	21
2 Praktická část.....	24
2.1 Vytvoření programu.....	24
2.2 Typy simulací.....	24
2.2.1 Debyeho funkce.....	24
2.2.2 Debyeho funkce s parametry α a β	27
2.2.3 Coleho – Coleho kruhový diagram.....	28
2.2.4 Směsné vztahy.....	29
2.3 Ověření na praktickém příkladu.....	32
2.3.1 Naměřené hodnoty složené soustavy laku a slídy.....	32
2.3.2 Porovnání simulace s měřením složené soustavy laku a slídy.....	34
2.3.3 Naměřené hodnoty složené soustavy polypropylenu plněného vápencem.....	35
2.3.4 Porovnání simulace s měřením složené soustavy polypropylenu plněného vápencem.....	35
3 Závěr.....	37
4 Seznam použité literatury.....	38

Seznam použitých symbolů

ε'	(-) relativní permitivita
ε''	(-) ztrátové číslo
δ	(°) ztrátový úhel
$\operatorname{tg} \delta$	(-) ztrátový činitel
φ	(°) fázový úhel
ε_s	(-) statická permitivita (při $\omega \rightarrow 0$)
ε_∞	(-) optická relativní permitivita (při $\omega \rightarrow \infty$)
τ	(s) relaxační doba, která je mimo jiné i funkcí teploty
α	(-) distribuční parametr, frekvenčně nezávislý, určující šířku distribuce relaxačních dob
β	(-) činitel, který charakterizuje asymetrii
ρ_V	(Ωm) vnitřní rezistivita
ρ_p	(Ω) povrchová rezistivita
E_p	(Vm^{-1}) elektrická pevnost
μ_i	(D) elektrický moment
P	(Cm^{-2}) vektor polarizace
P_N	(Cm^{-2}) polarizace nasycení
P_Z	(W) ztrátový výkon
p	(Wkg^{-1}) měrné dielektrické ztráty
ε'_1	(-) permitivita dispergovaných částic
ε'_2	(-) permitivita matričního prostředí
ε'_s	(-) permitivita složené soustavy
ε'_{ef}	(-) efektivní permitivita prostředí těsně obklopujícího dispergované částice

pozn.: Symboly použité v programu:

e_s	zastupuje ε_s , statická permitivita (při $\omega \rightarrow 0$)
e_opt	zastupuje ε_∞ , optická relativní permitivita (při $\omega \rightarrow \infty$)
t	zastupuje τ , relaxační doba, která je mimo jiné i funkcí teploty
a	zastupuje α , distribuční parametr, frekvenčně nezávislý, určující šířku distribuce relaxačních dob
B	zastupuje β , činitel, který charakterizuje asymetrii
e'	zastupuje ε' , relativní permitivita
e''	zastupuje ε'' , ztrátové číslo
tg d	zastupuje $\operatorname{tg} \delta$, ztrátový činitel

Úvod

V dnešní době hraje v elektrotechnice technologie velmi důležitou roli a je to jeden z velmi perspektivních oborů do budoucna. Technologie a chování dielektrik je klíčovým prvkem pro bezporuchový chod dnes velmi složitých elektronických systémů. Abychom pochopili vlastnosti těchto dielektrických podsystemů, neobejdeme se bez znalostí vysvětlujících jejich chování a dění ve struktuře materiálů. Pro pochopení určitých souvislostí a vlastností dielektrik nám mohou pomoci také počítačové simulace.

Pro zlepšení např. elektrických nebo mechanických vlastností látek se uměle vytvářejí složené materiály – kompozity. Při návrhu i použití kompozitů je často žádoucí znát nejen materiálové vlastnosti soustavy, nýbrž i vztah těchto vlastností k příslušným vlastnostem složek. To řeší teorie složených (směsných) soustav, jejímž hlavním úkolem je vyhledání přiměřeného směsného vztahu.

1 Teoretická část

1.1 Fyzika dielektrik

1.1.1 Základní pojmy

Dielektrikum je látka, ve které dochází k polarizaci částic a tak má schopnost, po přiložení elektrického pole, akumulovat elektrickou energii. Ideální dielektrikum (izolant) obsahuje pouze vázané elektrické náboje, ale reálné dielektrikum obsahuje vždy i nějaké volné elektrické náboje. Každý izolant je současně dielektrikem, avšak všechna dielektrika nejsou izolanty. K dielektrikům se řadí i četné látky s vlastnostmi polovodičů (Ge, Si).

Základní fyzikální jevy, ke kterým dochází v dielektriku:

- dielektrická polarizace – posun vázaných nábojů
- elektrická vodivost – posun volných nábojů
- dielektrické ztráty

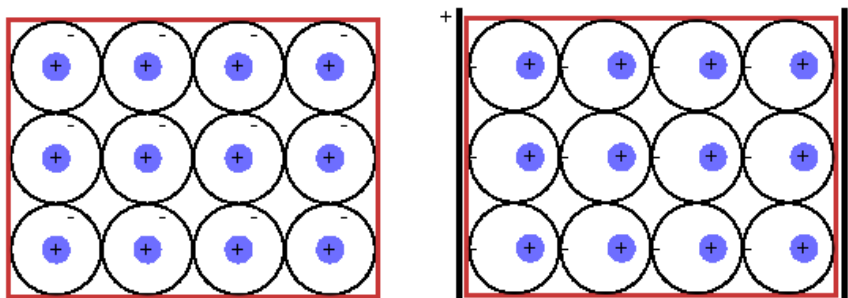
Základní elektrické veličiny:

- | | | |
|-------------------------|----------------|---|
| • relativní permitivita | ε' | (-) - je mírou polarizace (komplexní permitivita) |
| • vnitřní rezistivita | ρ_V | (Ωm) |
| • povrchová rezistivita | ρ_p | (Ω) |
| • ztrátový činitel | $\tan \delta$ | (-) |
| • elektrická pevnost | E_p | (Vm^{-1}) |

Podle stavby molekul rozlišujeme látky:

- neutrální (nepolární)

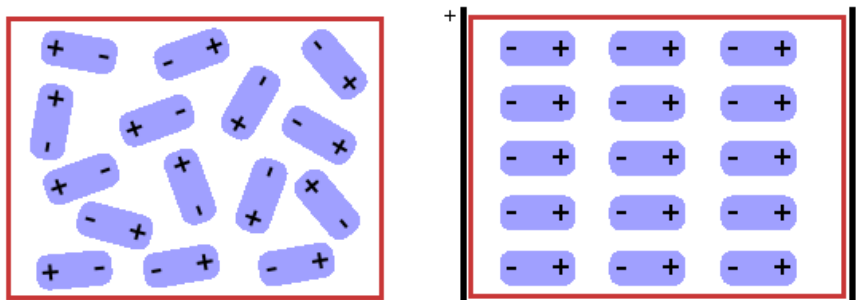
stavba jejich molekul je zcela symetrická, vázané elektrické náboje jsou rozloženy souměrně a jejich těžiště splývají. Působením elektrického pole se symetrie poruší. Nepolární molekula vytvoří elektrický dipól a nabude indukovaný elektrický moment μ_i , jak můžeme vidět na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Schéma nepochárního dielektrika v elektrickém poli

- dipólové (polární)

stavba jejich molekul je nesymetrická; vyznačují se (i v nepřítomnosti elektrického pole) stálým elektrickým momentem. V přítomnosti elektrického pole se dipólové molekuly stáčí do směru pole. Tím získají přídatný (indukovaný) dipólový moment, který se vektorově skládá se stálým dipólovým momentem, viz. obr. 1.2.



Obr. 1.2 Schéma polárního dielektrika v elektrickém poli

Tento jev se označuje jako iontová polarizace, popř. jako orientační polarizace, neboť polarizace vzniká orientací částic dielektrika.

Mezi dielektrika s polárními molekulami patří např. voda, amoniak, některé organické molekuly apod. Vlastní dipólové momenty polárních dielektrik jsou o několik řádů vyšší ve srovnání s indukovanými momenty nepolárních dielektrik.

Orientační polarizace je závislá také na jiných vlivech, především tepelném pohybu částic nebo vzájemném působení částic. To způsobuje, že polarizace dielektrika není nikdy dokonalá, tzn. nikdy nedojde k úplnému natočení všech částic.

Jednotkou pro elektrický (dipólový) moment v oblasti mikrosvěta je debye (D), přičemž $1\text{D} = 1/3 \cdot 10^{-29} \text{Cm}$.

1.1.2 Polarizace

Polarizace je fyzikální jev, při němž se působením vnějšího i vnitřního elektrického pole přemísťují (posouvají) elektricky vázané náboje dielektrika ze svých rovnovážných poloh do nových na malé omezené vzdálenosti, a obsahuje-li látka dipólové molekuly, natáčí se (orientují se) tyto do směru pole. Výjimečně jsou i volné náboje v dielektriku příčinou polarizace.

Mírou polarizace v látce je **vektor polarizace** $P (\text{Cm}^{-2})$ a **relativní permitivita** $\epsilon' (-)$. **Polarizovatelnost** $\alpha (-)$ vyjadřuje schopnost polarizace látky; je základní fyzikální vlastností dielektrik. S polarizovatelností souvisí permitivita.

Vztah mezi relativní permitivitou, polarizovatelností a koncentrací částic udává Clausiova – Mosottiho rovnice:

$$\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon' + 2} = \frac{n\alpha}{3\varepsilon_0} = p(-) \quad (\text{měrná polarizace}) \quad (1.1)$$

$$\varepsilon' = \frac{1 + 2p}{1 - p} \quad (1.2)$$

Polarizační mechanismy

V dielektrických látkách se často vyskytuje současně několik druhů polarizací, přičemž slabší z nich bývají překryty mechanismy silnějšími. Zpravidla se rozlišují

- jevy s rychlým průběhem, tzv. pružné (elastické) polarizace,
- jevy s pomalým průběhem, tzv. relaxační polarizace,
- zvláštní polarizace.

Pružné polarizace

Vyznačují se extrémně krátkou dobou trvání; proběhnou prakticky okamžitě, pružně a bez ztrát energie. Nejsou závislé na frekvenci v celém rozsahu frekvencí používaných v elektrotechnice.

Patří sem polarizace elektronová, která se vyskytuje u všech dielektrik, nezávisí na teplotě a doba ustavení je 10^{-16} až 10^{-14} s, a polarizace iontová vyskytující se u iontových krystalů, je závislá na teplotě a doba ustavení je 10^{-13} až 10^{-12} s.

Relaxační polarizace

Vyznačují se tím, že po přiložení elektrického pole přibývá polarizace pomalu a obdobně - polarizace pomalu ubývá po odpojení pole. Doby, potřebné k ustálení těchto jevů, jsou relativně dlouhé. Časový průběh jejich dozínání je exponenciální, charakterizovaný časovou konstantou τ (s), tzv. relaxační dobou. Pomalé polarizace jsou značně závislé na teplotě. Jsou vždy provázeny ztrátami energie v dielektriku, které se tím ohřívá.

Časovou závislost polarizace $P = F(t)$ popisují vztahy:

$$\text{po připojení elektrického pole: } P = P_N [1 - \exp(-\frac{t}{\tau})] \quad (1.3)$$

$$\text{po odpojení elektrického pole: } P = P_N \exp(-\frac{t}{\tau}) \quad (1.4)$$

kde P_N (Cm^{-2}) je polarizace nasycení.

Relaxační doba je definována dobou, za níž po odstranění elektrického pole poklesne úroveň polarizace v látce na $1/e$ násobek původní hodnoty P_N .

K těmto polarizacím patří polarizace dipólová, která se vyskytuje u polárních látek, doba ustavení je 10^{-12} až 10^{-8} s u látek nízkomolekulárních, u látek makromolekulárních o mnoho řádů vyšší. Dále polarizace iontová-relaxační, která se vyskytuje v iontových látkách s netěsným uložením iontů (anorganická skla, keramika).

Zvláštní polarizace

K těmto polarizacím patří polarizace mezivrstvová (migrační), samovolná (spontánní), trvalá a rezonanční.

S tím souvisí zvláštní polarizační jevy, jako jsou elektrostrikce, pyroelektrický jev a piezoelektrický jev.

Elektrostrikce - vyskytuje se u všech dielektrik. Dochází k mechanickým deformacím, tj. změnám geometrických rozměrů dielektrického tělesa, následkem polarizace. Změna $\Delta l \sim E^2$.

Pyroelektrický jev - vyskytuje se u všech přirozených krystalických elektretů, tj. u některých krystalů bez středové souměrnosti, spontánně polarizovaných. Na koncových povrchových plochách jsou permanentní vázané náboje. Zahřátím nebo ochlazením krystalu se změní polarizace uvnitř krystalu a změní se i polarita. Pyroelektriky jsou všechny látky se spontánní polarizací.

Piezoelektrický jev - vyskytuje se jen v krystalech s anizotropními vlastnostmi, které nemají střed souměrnosti (jsou středově nesouměrné, acentrické). Přímý piezoelektrický jev - mechanickou deformací (namáháním tlakem, tahem, ohybem nebo kroucením) se tělesa elektricky polarizují. Na jejich povrchu vzniknou elektrické náboje. Obrácený (reciproký) piezoelektrický jev - schopnost deformace (změny rozměrů nebo tvaru krystalu) působením vnějšího elektrického pole. Změna $\Delta l \sim E$. Piezoelektrické vlastnosti mají všechny látky feroelektrické; existuje však mnoho piezoelektrických látek, které nejsou feroelektriky. Piezoelektrika jsou např. křemen, turmalín (boritokřemičitan Al-Mg-Ca), četné látky keramické.

Rozdíly mezi elektrostrikcí a piezoelektrickým jevem:

Elektrostrikce se vyskytuje u všech dielektrik, piezoelektrický jev pouze u krystalických látek s anizotropními vlastnostmi, změna Δl u elektrostrikce je úměrná energii elektrického pole, akumulované v látce (tj. úměrná E^2), u piezoelektrického jevu je $\Delta l \sim E$, piezoelektrický jev existuje přímý a obrácený.

1.1.3 Elektrická vodivost

Mechanismus vodivosti spočívá v pohybu volných nebo slabě vázaných elektrických nábojů v elektrickém poli. Závisí na druhu nosičů elektrického náboje (velikosti náboje, driftové pohyblivosti) a jejich koncentraci.

Elektrická vodivost

A.

- iontová (ionty příměsí, nečistot; ionty vlastní látky)
- elektronová (v elektrických polích o velmi vysoké intenzitě)
- elektroforetická (koloidní částice v kapalných látkách)

B.

- vnitřní
- povrchová (u tuhých látek)

Elektrická vodivost plynů

Plyny jsou za normálních fyzikálních podmínek a při nepříliš velkých intenzitách elektrického pole velmi dobrými izolanty. Ionizací částí jejich neutrálních molekul se plyny stávají vodivými. Ionizace je fyzikální děj, při němž se z molekul nebo atomů vytvářejí elektrony a kladné ionty (kationty).

Existují:

- nárazová ionizace - vzniká v důsledku vzájemných srážek částic, které mají dostatečně velkou kinetickou energii k odtržení elektronů od atomu,
- fotoelektrická ionizace (fotoionizace) - je způsobena absorpcí krátkovlnného záření (ultrafialového, rentgenového nebo záření γ); tím může elektron získat energii potřebnou k odtržení od jádra,
- tepelná ionizace - je podmíněna tepelným stavem plynu - vysokou teplotou nebo tepelným zářením ohřátého plynu (fotoionizace).

Současně s ionizací nastává rekombinace volných nosičů nábojů, tj. opětné spojování dvou částic se stejným nábojem opačného znaménka za vzniku neutrální částice (molekuly nebo atomu). Při působení ionizačního činitele v plynu probíhají současně dva protichůdné děje - ionizace a rekombinace - až do dosažení dynamické rovnováhy.

Elektrická vodivost kapalin

Souvisí úzce s chemickým složením, strukturou, s obsahem nečistot a příměsí.

Podle chemických vazeb v molekulách se rozlišují:

- kapaliny s kovalentními vazbami - jsou-li v čistém stavu, mají elektroizolační vlastnosti (oleje, čistá voda, kyseliny, alkoholy),
- kapaliny s iontovými nebo převážně iontovými vazbami - jde o taveniny tuhých látek (solí) s iontovými vazbami nebo roztoky takových látek v ionizujícím rozpouštědle. Jsou to elektrolyty - vodiče druhé třídy. Dobře vedou proud, ale přitom se chemicky mění,
- látky s kovovými vazbami - jde o kovy a slitiny kovů v kapalném stavu, které jsou vodiči první třídy. Dobře vedou proud a přitom se průchodem proudu nemění.

Elektrická vodivost tuhých izolantů

Závisí na chemickém složení a struktuře látek, defektech vnitřního uspořádání a na druhu a obsahu nečistot a příměsí. Povrchová elektrická vodivost tuhých izolantů je podmíněna především vlhkostí adsorbovanou na jejich povrchu.

1.1.4 Dielektrické ztráty

Technické dielektrikum vykazuje oproti ideálnímu nenulovou elektrickou vodivost, dále často obsahuje nečistoty, příměsi, vlhkost apod. Přiložené elektrické pole pak podmiňuje vznik nestacionárních pochodů uvnitř dielektrika, které vedou ke ztrátám energie.

Ztráty v dielektriku představují celkovou energii, rozptýlenou v dielektriku v časové jednotce při jeho vložení do elektrického pole. Ztráty se vyskytují při působení stejnosměrného i střídavého pole, jsou provázeny ohřevem dielektrika a jsou příčinou změny fázového úhlu mezi napětím a proudem.

V kondenzátoru s dielektrikem, připojeném na zdroj střídavého napětí, předbíhá proud napětí o fázový úhel φ , který je menší než 90° . Platí

$$\varphi = 90^\circ - \delta,$$

kde δ ($^\circ$) je ztrátový úhel, který je mírou nedokonalosti dielektrika.

Ztráty v dielektriku

Celkové ztráty dielektrika jsou součtem několika druhů ztrát, rozdílných svojí fyzikální podstatou, ale souhlasných ve svém konečném působení na dielektrikum. Z hlediska fyzikální podstaty se rozlišují ztráty vodivostní, polarizační a ionizační.

Vodivostní ztráty

Vyskytují se u všech druhů dielektrik a jsou podmíněny ohmickou vnitřní a povrchovou vodivostí dielektrika. Vznikají při stejnosměrném i střídavém napětí a jejich důsledkem je degradace energie elektrického pole v Jouleovo teplo. Fyzikální podstatou ztrát jsou srážky volných nosičů nábojů s kmitajícími částicemi, které tvoří strukturu látky.

Polarizační ztráty

Mají významný podíl na celkové výši ztrát. Jsou podmíněny polarizačními pochody v dielektriku. Velikost těchto ztrát a jejich teplotní a frekvenční závislosti vycházejí z druhu vyskytujících se polarizací.

U elektronové a iontové polarizace se polarizační ztráty prakticky nevyskytují. Naopak velkými ztrátami, značně závislými na teplotě a na frekvenci, je provázena polarizace dipólová a iontová-relaxační.

Zvláštní druh ztrát (značných) představují ztráty ve feroelektriku, charakterizované vnitřní doménovou strukturou.

Tři typy závislosti ztrátového výkonu $P_Z = F(E)$:

- u dielektrik s deformačními polarizacemi (u bezztrátových dielektrik) je závislost lineární,
- v dielektriku s pomalými (relaxačními) polarizacemi má závislost tvar elipsy,
- u feroelektrik (seignettoelektrik) je závislost v oblasti pod Curieho bodem zobrazena hysterezní smyčkou.

Plocha opsaná ve druhém a třetím případě křivkami je úměrná velikosti dielektrických ztrát za jednu periodu střídavého pole.

Ke ztrátám polarizací patří ještě tzv. rezonanční ztráty, které se v dielektriku vyskytují až při frekvencích odpovídajících frekvencím světelného spektra a jsou charakterizovány silnou selektivností při určité frekvenci.

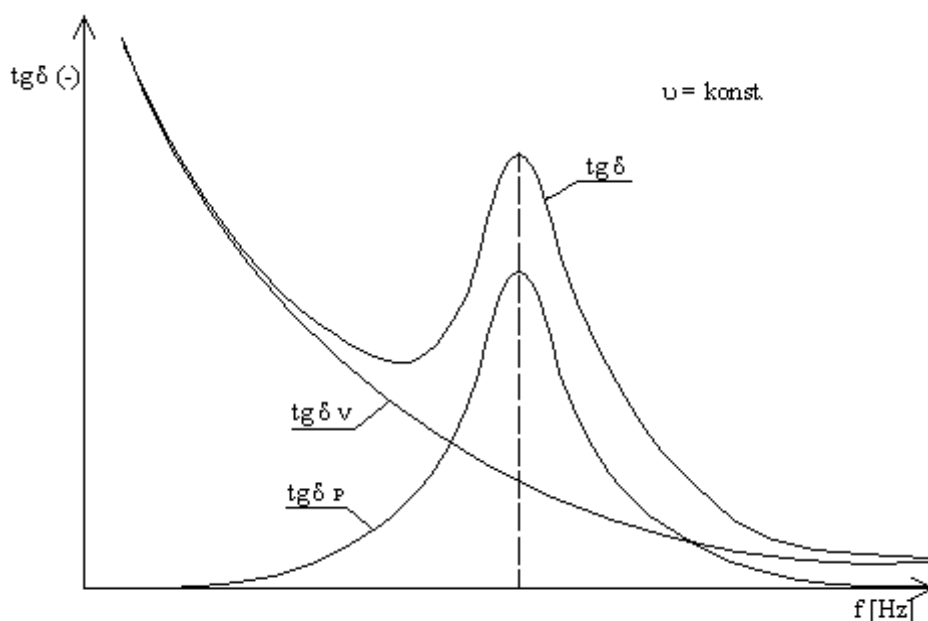
Ionizační ztráty

Vyskytují se u plynů, a dále u tuhých, resp. kapalných dielektrik, které obsahují plynové vměstky. Podmínkou vzniku ztrát je překročení tzv. prahu ionizace daného plynu.

Velikost dielektrických ztrát vyjadřují:

ztrátový úhel	δ	($^\circ$),
ztrátový činitel	$\operatorname{tg} \delta$	(-),
ztrátové číslo	ε''	(-),

měrné dielektrické ztráty p (Wkg^{-1}) - ztrátový výkon P_Z vztažený na jednotkový objem látky.



Obr. 1.3 Frekvenční závislost ztrátového činitele polárního dielektrika ($v = \text{konst.}$)

Vztahy (1.5), (1.9) a (1.10) z následující kapitoly vycházejí z analýzy polarizačních ztrát. Vodivostní ztráty se zahrnou do komplexní permitivity aditivním členem $\frac{\gamma_V}{\omega \epsilon_0}$ k imaginární složce citovaných vztahů, která představuje ztráty. Skutečný průběh závislosti ztrátového činitele na frekvenci potom můžeme vidět na obr. 1.3, kde $\text{tg } \delta_v$ představuje vodivostní ztráty a $\text{tg } \delta_p$ představuje polarizační ztráty.

1.1.5 Permittivita dielektrik

Paul Debye teoreticky odvodil pro komplexní permitivitu dielektrik za předpokladu jedné relaxační doby vztah:

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (1.5)$$

kde ϵ_s (-) je statická permitivita (při $\omega \rightarrow 0$),
 ϵ_∞ (-) je optická relativní permitivita (při $\omega \rightarrow \infty$),
 τ (s) je relaxační doba, která je mimo jiné i funkcí teploty.

Pro složky ε' a ε'' platí

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (1.6)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega \tau (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (1.7)$$

Ztrátový činitel je

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\omega \tau (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{\varepsilon_{\infty} + \varepsilon_s \omega^2 \tau^2} \quad (1.8)$$

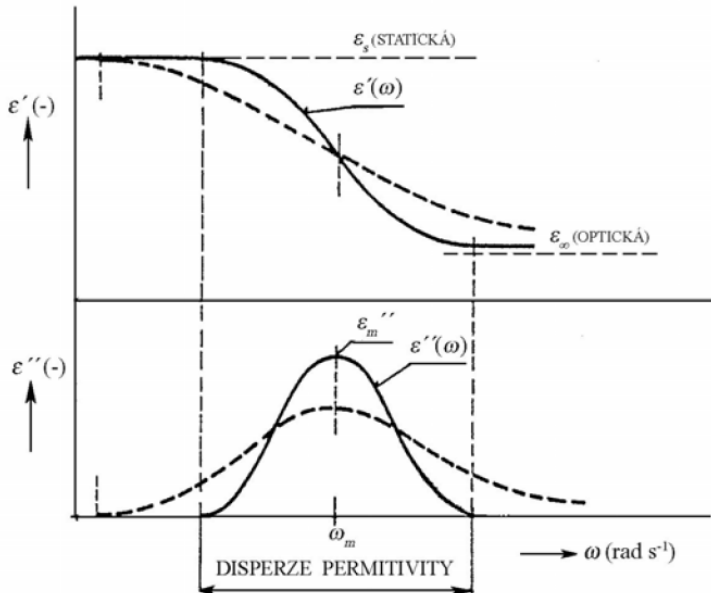
Grafickým zobrazením komplexní permitivity je Coleho – Coleho kruhový diagram se středem na ose ε' .

Coleho – Coleho kruhový diagram klasického Debyeho mechanismu vyhovuje jen pro malý počet dielektrik. Experimentální vyšetření mnoha kapalných a pevných dielektrik ukazuje, že jejich chování vystihuje oblouk se středem pod reálnou osou.

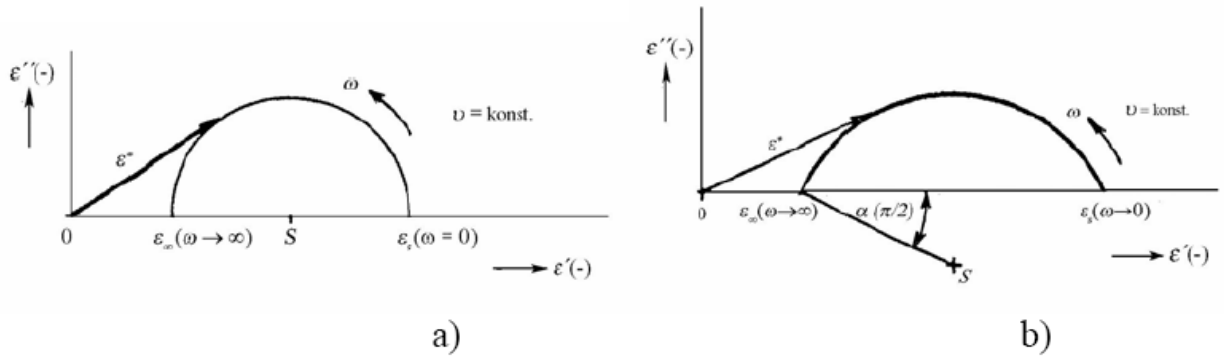
Pro tento případ zavedli Cole a Cole empirický vztah

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}}, \quad (1.9)$$

kde α (-) je distribuční parametr, frekvenčně nezávislý, určující šířku distribuce relaxačních dob.



Obr. 1.4 Závislost složek komplexní permitivity na kruhové frekvenci podle Debyeho teorie (plná čára) a při distribuci relaxačních časů (čárkovaně)



Obr. 1.5 Coleho - Coleho kruhový diagram ($v = \text{konst.}$) pro případ a) platnosti Debyeho teorie (jedna relaxační doba) b) distribuce relaxačních časů

U mnoha reálných dielektrik není však výše zmíněná závislost popsána částí kruhového oblouku. Křivka vykazuje jistou nesymetrii. Z toho důvodu upravili Havriliak a Negami Coleho – Coleho vztah zavedením činitele $\beta (-)$, takže je možno psát:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{[1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}]^\beta}, \quad (1.10)$$

kde $\beta (-)$ je činitel, který charakterizuje asymetrii.

Rozložením poslední rovnice na reálnou a imaginární část lze pro obě složky permitivity odvodit:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + r^{\frac{-\beta}{2}} (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cos(\beta\Theta), \quad (1.11)$$

$$\varepsilon'' = r^{\frac{-\beta}{2}} (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \sin(\beta\Theta), \quad (1.12)$$

$$\text{kde } \Theta = \arctg \left[\frac{(\omega\tau)^{1-\alpha} \cos(\alpha \frac{\pi}{2})}{1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha \frac{\pi}{2})} \right], \quad (1.13)$$

$$r = \left[1 + (\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha \frac{\pi}{2}) \right]^2 + \left[(\omega\tau)^{1-\alpha} \cos(\alpha \frac{\pi}{2}) \right]^2, \quad (1.14)$$

$0 \leq \alpha < 1, 0 < \beta \leq 1,$
 τ (s) je relaxační doba.

1.2 Složené soustavy

Složené soustavy neboli kompozity jsou tvořeny makroskopickými útvary dvou nebo více materiálových složek. Složená soustava musí být vytvořena člověkem, musí mít vlastnosti odlišné od vlastností složek; geometrické útvary jednotlivých složek rozdílného chemického složení jsou v soustavě spojeny v celém nebo téměř celém objemu.

1.2.1 Teorie složené soustavy

Významnou úlohu v teoretickém zkoumání složených soustav hraje geometrie soustavy, která zahrnuje především tyto činitele:

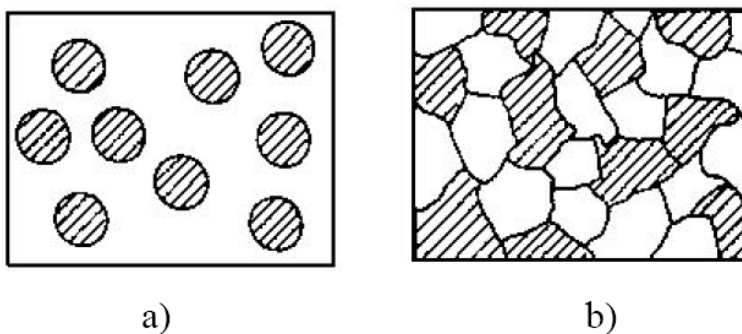
- typ soustavy,
- rozložení částic v soustavě,
- tvar částic,
- orientaci částic vzhledem k přiloženému elektrickému poli,
- velikost částic včetně distribuce rozměrů částic.

Typ soustavy je určován podle způsobu rozdělení složek soustavy. Z tohoto hlediska je nejčastější členění na:

- matriční soustavy,
- statistické soustavy.

Matriční soustava je tvořena základním souvislým prostředím (matricí), v němž jsou rozmístěny (dispergovány) částice složek ostatních. Dispergované částice mohou být v soustavě rozloženy pravidelně nebo chaoticky, rovnoměrně či nerovnoměrně. Matriční prostředí a dispergované částice nejsou geometricky rovnocenné.

Ve statistické soustavě jsou částice všech složek vzájemně nahodile rozloženy v celém objemu soustavy. Geometricky jsou všechny složky rovnocenné.



Obr. 1.6 a) Matriční soustava b) statistická soustava (v řezu)

Rozložení částic v soustavě může být buď pravidelné nebo chaotické. Pravidelné rozložení se většinou předpokládá při teoretickém řešení soustav. V reálných materiálech se častěji vyskytuje rozložení chaotické. Nejčastěji uvažovaným pravidelným rozložením jsou kulovité nebo krychlové částčky v jednoduché kubické mřížce.

Vliv tvaru částic vyplývá z teorie rozložení elektromagnetického pole uvnitř těles. Jednoduché analytické vyjádření lze nalézt pro kouli, případně elipsoid. Pro obecnější tvary není možné získat analytické vyjádření a vztahy pro rozložení pole se určují numericky nebo graficky. Převážnou část prakticky se vyskytujících tvarů částíček nelze přesně popsat základními geometrickými útvary. Jedná se v nejlepším případě o částice geometricky přesně definovaných, avšak deformovaných tvarů, zpravidla však o útvary naprosto libovolného tvaru. Jedinou cestou, umožňující řešení soustavy s tvarově libovolnými částicemi, je aproximace daných částic vhodným, geometricky přesně definovaným tvarem, obecně elipsoidem, určeným třemi vzájemně kolmými poloosami o délkách a , b , c . Zvláštními případy elipsoidu pak mohou být sféroidy ($a \neq b = c$) či koule ($a = b = c$).

Vliv velikosti dispergovaných částic nebývá tak významný a ve většině teoretických prací není vliv velikosti částic uváděn. Zřejmě v důsledku toho, že při řešení směsných vztahů přechází objem částic sumací do celkového objemu příslušné materiálové složky.

1.2.2 Permitivita složené soustavy

Z hlediska teoretického řešení složených soustav není rozhodující, zda se sledují vlastnosti elektrické, magnetické nebo tepelné. Je tomu tak proto, že chování materiálů v elektrických, magnetických a tepelných polích je popsáno formálně stejnými diferenciálními rovnicemi a je charakterizováno stejnými okrajovými podmínkami. Lze tedy směsné vztahy, odvozené např. pro permitivitu, použít i pro sledování permeability, vnitřní konduktivity, měrné tepelné vodivosti, příp. součinitele difúze.

Přísně teoretický přístup k řešení složených soustav vychází z teorie potenciálů v silových polích s přihlédnutím k okrajovým podmínkám. Základním úkolem je pak pro daný případ nalézt příslušné řešení Laplaceovy rovnice. Výchozím bodem řešení je zjištění potenciálu v libovolně zvoleném bodě uvnitř i vně jedné makroskopické částice uložené do vnějšího silového pole. Předložit řešení zadané úlohy lze však pouze v případě částic o tvaru, který lze řešit v silovém poli, tedy koule, sféroidu nebo elipsoidu, a to při nízké koncentraci dispergovaných částic v soustavách matričního typu. Přítomnost většího počtu dispergovaných částic v soustavě vede i za předpokladu, že částice jsou popsány relativně jednoduchými geometrickými tvary, k vážným matematickým obtížím. Na každou jednotlivou částici nepůsobí totiž pouze vnější silové pole, nýbrž i silová pole vytvářená ostatními dispergovanými částicemi. Stejně tak působí i sledovaná částice svým polem na částice ostatní. V důsledku vzájemného ovlivňování polí nelze pak potenciály v jednotlivých bodech soustavy vyčíslit. Výjimkou jsou případy, kdy dispergované částice jsou v soustavě pravidelně rozloženy, nebo jedná-li se o velmi nízkou koncentraci dispergovaných částic.

Při pojednáních o složených soustavách se obvykle předpokládá, že všechny složky soustavy představují homogenní a izotropní prostředí, že částice všech složek jsou velké ve srovnání s rozměry atomů nebo molekul, že mezi částicemi složek nedochází k vytvoření žádných chemických vazeb ani k žádným fyzikálně-chemickým reakcím, tzn. že se na hranicích mezi částicemi nevytvářejí žádné vodivé, polovodivé nebo dielektrické mezivrstvy a že složky netvoří tuhý roztok. Jedná-li se o elektrické vlastnosti, předpokládá se ještě, že složená soustava se sleduje při nízkých intenzitách elektrického pole a při frekvencích ležících mimo relaxační oblast frekvenční disperze.

1.2.3 Směsné vztahy

Při návrhu i použití kompozitů je často žádoucí znát nejen materiálové vlastnosti soustavy, nýbrž i vztah těchto vlastností k příslušným vlastnostem složek. To řeší teorie složených (směsných) soustav, jejímž hlavním úkolem je vyhledání přiměřeného směsného vztahu. Směsný vztah musí jednoznačně určovat výslednou vlastnost fiktivního materiálu, který bude ve vnějším silovém poli vykazovat stejné vlastnosti jako složená soustava.

Výsledná vlastnost X_S mnohasložkové soustavy složené z materiálů o vlastnostech X_1, X_2, \dots, X_n a poměrných objemových dílech složek v soustavě v_1, v_2, \dots, v_n , je určena obecně funkcí

$$X_S = F(X_1, X_2, \dots, X_n, v_1, v_2, \dots, v_n), \quad (1.15)$$

přičemž

$$\sum_{i=1}^n v_i = 1. \quad (1.16)$$

Funkční závislost (1.15) je v konkrétních případech složitá, neboť zahrnuje i vliv tzv. geometrie složené (směsné) soustavy. Výjimkou jsou případy jednoduchých složených soustav, tvořených např. paralelně nebo sériově řazenými vrstvami několika různých materiálů.

Vzájemná záměna indexů v analytickém vyjádření směsného vztahu je možná pouze při popisu soustav statistického typu, v nichž jsou všechny složky soustavy geometricky rovnocenné. Při popisu maticí soustav je záměna indexů ve směsném vztahu nepřipustná.

Nejčastějším případem řešených složených soustav bývají soustavy dvousložkové. Pro jejich permitivitu byla v minulosti odvozena, mj. např. již Maxwellem, a v literatuře uváděna řada směsných vztahů. Pečlivé prozkoumání jejich vnějšího tvaru však ukazuje, že velká část vztahů je si nejen formálně podobná, nýbrž je ve vzájemném vztahu a liší se od jistého obecného tvaru směsného vztahu pouze mírou odpovídající použité aproximace.

Většina směsných vztahů popisuje maticí soustavy s maticím prostředím o permitivitě ε'_2 a dispergovanými částicemi kulového tvaru o permitivitě ε'_1 . Při odvození zevšeobecněného vztahu se uvažuje, že každá dispergovaná částice je obklopena prostředím o efektivní permitivitě ε'_{ef} , její hodnota není obecně známa, leží však v rozmezí $< \varepsilon'_2; \varepsilon'_S >$.

Vhodnější, než sledovat hodnoty elektrických potenciálů a intenzit elektrického pole v jednotlivých bodech složené soustavy, je pracovat se středními prostorovými hodnotami elektrické indukce a intenzity elektrického pole. Vychází-li se z těchto středních hodnot, lze pro sledovaný případ částic kulového tvaru vyjádřit permitivitu soustavy ε'_S výrazem

$$\varepsilon'_s = \varepsilon'_2 \left[1 + v_1 \left(\frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2} - 1 \right) \frac{3\varepsilon'_{ef}}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_{ef}} \right], \quad (1.17)$$

který lze považovat za zevšeobecněný směsný vztah.

Maxwellův směsný vztah

Maxwell uvažoval, že při nízké hodnotě objemového dílu v_1 bude průměrná vzdálenost mezi dispergovanými částicemi v soustavě mnohem větší než je velikost částic, takže vzájemné působení mezi částicemi může být zanedbáno. V tomto případě bude okolí každé dispergované částice charakterizováno se značnou přesností permitivitou matričního prostředí ε'_2 . Maxwell tedy využil aproximace $\varepsilon'_{ef} = \varepsilon'_2$ a pro případ matriční soustavy s nízkou koncentrací dispergovaných částic tvaru stejných koulí odvodil dodnes používaný směsný vztah

$$\frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_2} = 3v_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_2}. \quad (1.18)$$

Böttcherův směsný vztah

Böttcher vyslovil jeden z předpokladů, mající za úkol pomoci vyřešit soustavy o vyšším poměrném objemovém dílu dispergovaných částic v_1 .

Jeho teorie vychází z představy, že důsledek vzájemného působení elektrických polí jednotlivých částic lze pohodlně vyjádřit tak, že každá částice soustavy podléhá vlivu okolního prostředí, jež je charakterizováno permitivitou složené soustavy, tj. ε'_s . Efektivní permitivita pro soustavu s kulovými částicemi je pak vyjádřena vztahem

$$\frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_s} = 3v_1 \frac{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 + 2\varepsilon'_s}. \quad (1.19)$$

Lichteneckerův směsný vztah

Velmi známým a v technické praxi často používaným směsným vztahem je Lichteneckerův mocninový vztah

$$\varepsilon'^k_s = \sum_{i=1}^n v_i \varepsilon'^k_i. \quad (1.20)$$

Pro případ dvousložkové soustavy je tvaru

$$\varepsilon'^k_s = v_1 \varepsilon'^k_1 + v_2 \varepsilon'^k_2. \quad (1.21)$$

Jedná se o vztah obsahující empirický parametr k , závislý zejména na tvaru a orientaci částic složené soustavy, který může obecně nabývat jakékoliv hodnoty v rozmezí $<-1; 1>$. Např. pro

soustavu obsahující částice tvaru lamel je vhodná hodnota $k = 2/3$, pro soustavu s částicemi zakulacených tvarů $k = 1/3$, apod.

Pro krajní polohy parametru k odpovídá předchozí rovnice hraničním Wienerovým vztahům

$$\varepsilon'_S = v_1 \varepsilon'_1 + v_2 \varepsilon'_2 \text{ a} \quad (1.22)$$

$$\frac{1}{\varepsilon'_S} = v_1 \frac{1}{\varepsilon'_1} + v_2 \frac{1}{\varepsilon'_2}, \quad (1.23)$$

které popisují permitivitu soustavy složené ze dvou paralelně či sériově řazených vrstev.

Pro hodnotu $k \rightarrow 0$ přechází rovnice v tzv. Lichteneckerův logaritmický vztah

$$\log \varepsilon'_S = v_1 \log \varepsilon'_1 + v_2 \log \varepsilon'_2. \quad (1.24)$$

Lichteneckerův logaritmický vztah je tvarově jednoduchý a dobře popisuje složené soustavy matričního typu obsahující částice kulového tvaru a soustavy statistického typu s částicemi libovolného či neurčitého tvaru při chaotickém uspořádání složek s libovolnou hodnotou poměrného objemového dílu všech složek soustavy. Popis dvousložkové složené soustavy vztahem (1.24) bude tím přesnější, čím menší bude poměr permitivit obou složek; při odvozování svých vztahů uvažoval Lichtenecker dvě složky o nejvyšším poměru

$$\frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2} = 4.$$

2 Praktická část

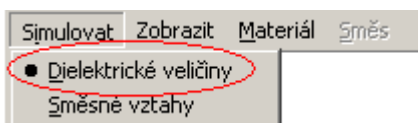
2.1 Vytvoření programu

Program je vytvořen v programovacím prostředí C++ Builder 6.0 v jazyce C++. Program je připraven pro použití při výuce. Slouží k simulaci průběhů relativní permitivity, ztrátového činitele a ztrátového čísla v závislosti na frekvenci podle Debyeho teorie. Lze modelovat také průběhy závislosti mezi složkami komplexní permitivity podle Coleho - Coleho a sledovat vliv parametrů α a β . U složených soustav je možné simulovat průběh relativní permitivity v závislosti na frekvenci podle Maxwellova, Böttcherova a Lichteneckerova směsného vztahu. Je ovšem nutné si uvědomit, že vypočítané průběhy budou ve skutečnosti platit pouze při frekvencích ležících mimo relaxační oblast frekvenční disperze. K dispozici je také databáze parametrů materiálů, která může být libovolně rozšiřována.

2.2 Typy simulací

2.2.1 Debyeho funkce

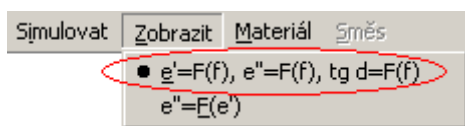
V hlavním menu vybereme *Simulovat* → *Dielektrické veličiny*:



Obr. 2.1 Volba simulace

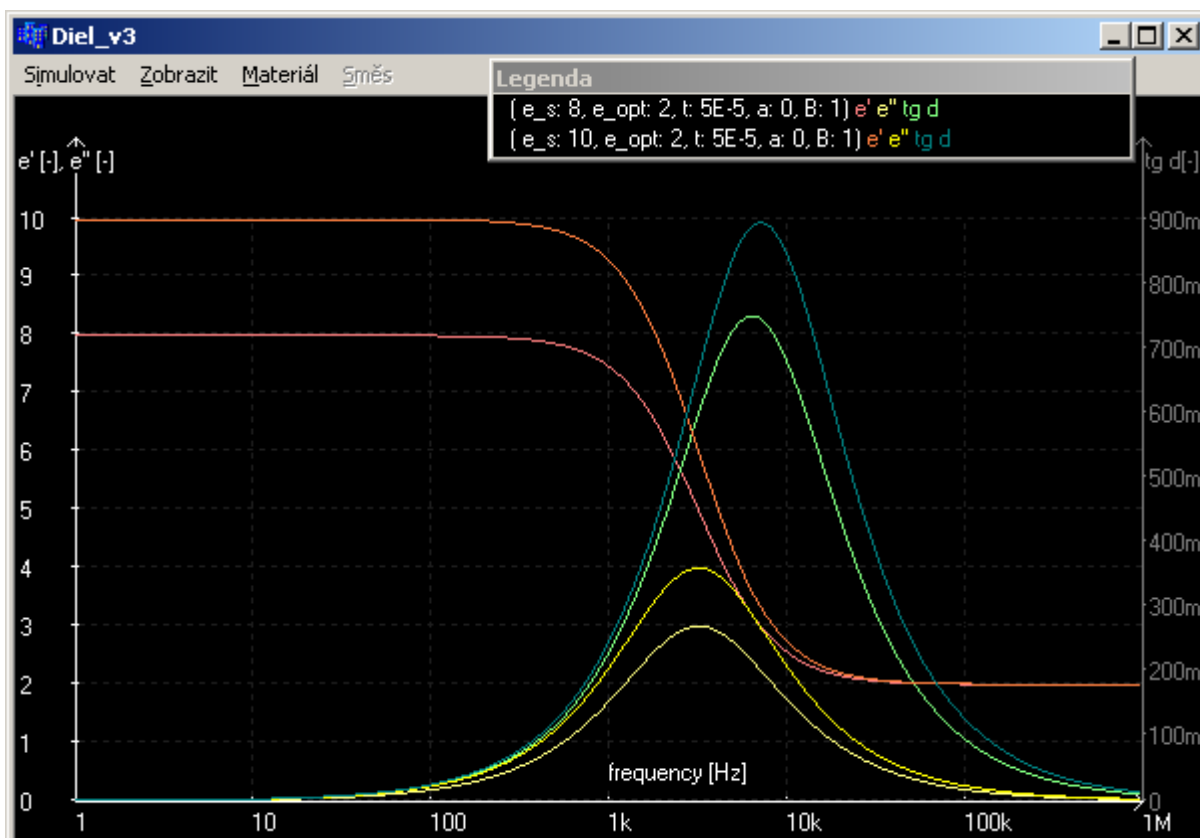
Aplikace umožňuje zobrazovat současně průběhy neomezeného počtu materiálů. U každého materiálu je možné nezávisle nechat zobrazit křivku frekvenční závislosti relativní permitivity, ztrátového činitele, ztrátového čísla a Coleho-Coleho kruhový diagram.

Pro zobrazení relativní permitivity, ztrátového činitele a ztrátového čísla v závislosti na frekvenci zvolíme v menu položku *Zobrazit* $\rightarrow e' = F(f)$, $e'' = F(f)$, $\text{tg } d = F(f)$:



Obr. 2.2 Volba zobrazení závislosti

Na následujícím obrázku vidíme příklad zobrazení křivek v závislosti na frekvenci:

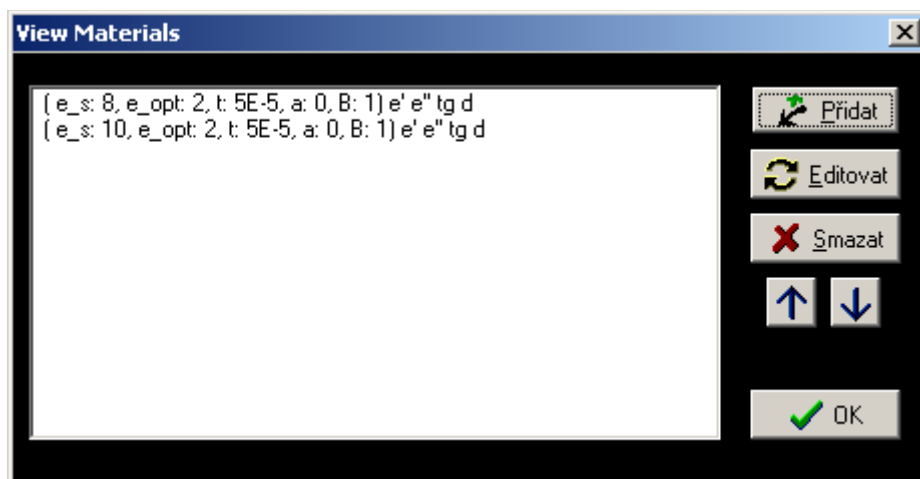


Obr. 2.3 Simulace závislosti průběhu dielektrických veličin na frekvenci

Na jedné ose jsou zobrazeny zároveň hodnoty relativní permitivity ε' a ztrátového čísla ε'' a na druhé ose je ztrátový činitel $\text{tg } \delta$. Každá osa má svoje měřítko, lze jim ovšem nastavit měřítko stejné v menu *Nastavení*. U frekvenční osy můžeme také v určitém rozsahu hodnot měnit měřítko.

V legendě u každého materiálu vidíme, co která křivka představuje podle její barvy, veličiny jsou pro přehlednost uvedeny bez jednotek - **e_s**, **e_opt**, **a**, **B** mají rozměr (-) a **t** (s).

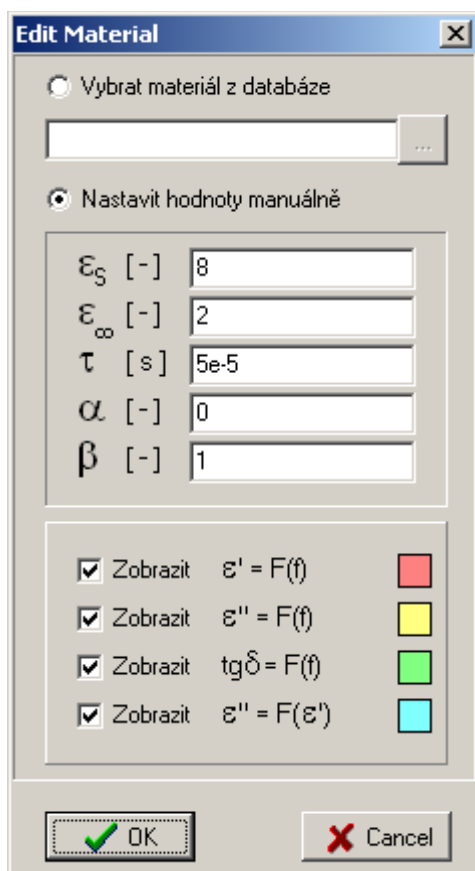
Přes položku menu *Materiál* \rightarrow *Editovat* se dostaneme do editačního menu materiálů:



Obr. 2.4 Okno na editaci materiálů

Pořadí materiálů v seznamu určuje pořadí, ve kterém se budou křivky vykreslovat na plochu. Přes toto menu je možné přidat další materiál (tl. *Přidat*), editovat již existující materiál (tl. *Editovat*, nebo dvojklikem na požadovanou položku), smazat libovolný materiál (tl. *Smazat*) a měnit pořadí materiálů v seznamu.

Přidat další materiál lze dvěma způsoby, přes menu *Materiál* → *Přidat* nebo *Materiál* → *Editovat* → *Přidat*:

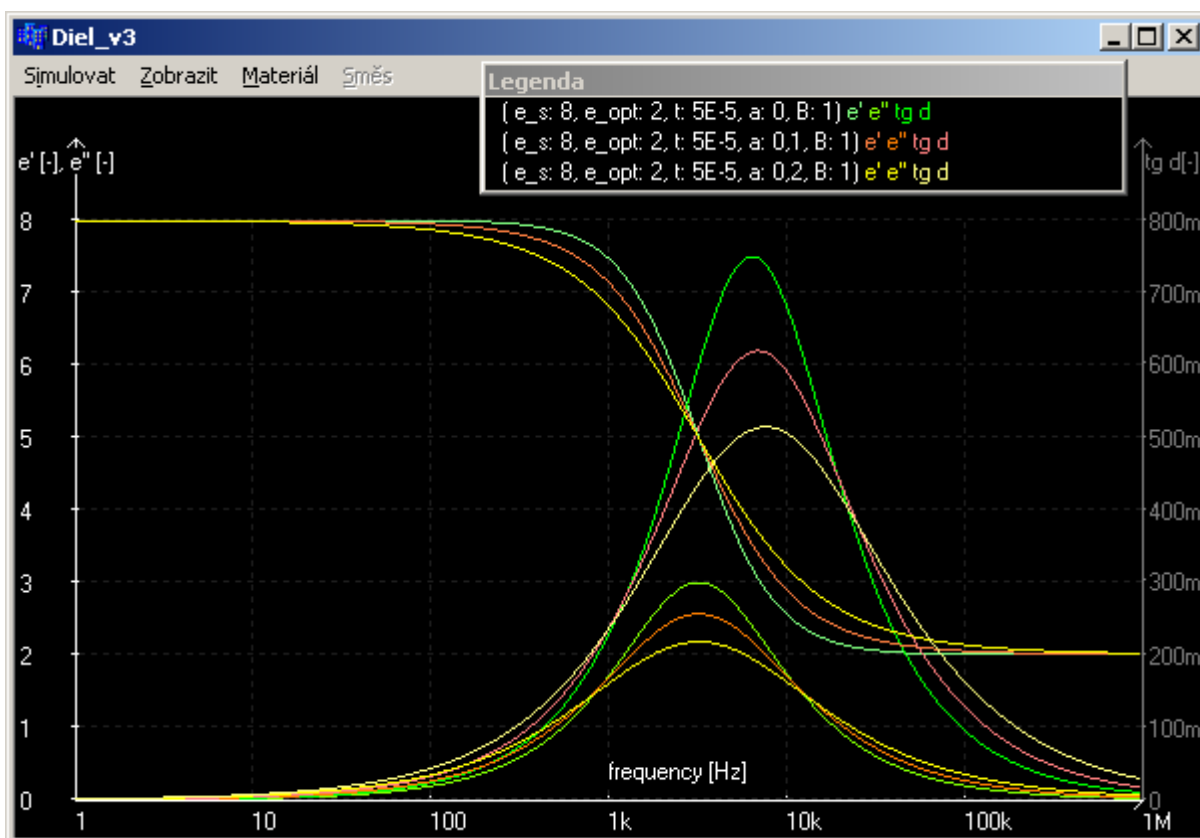


Obr. 2.5 Okno přidání nebo editace materiálu

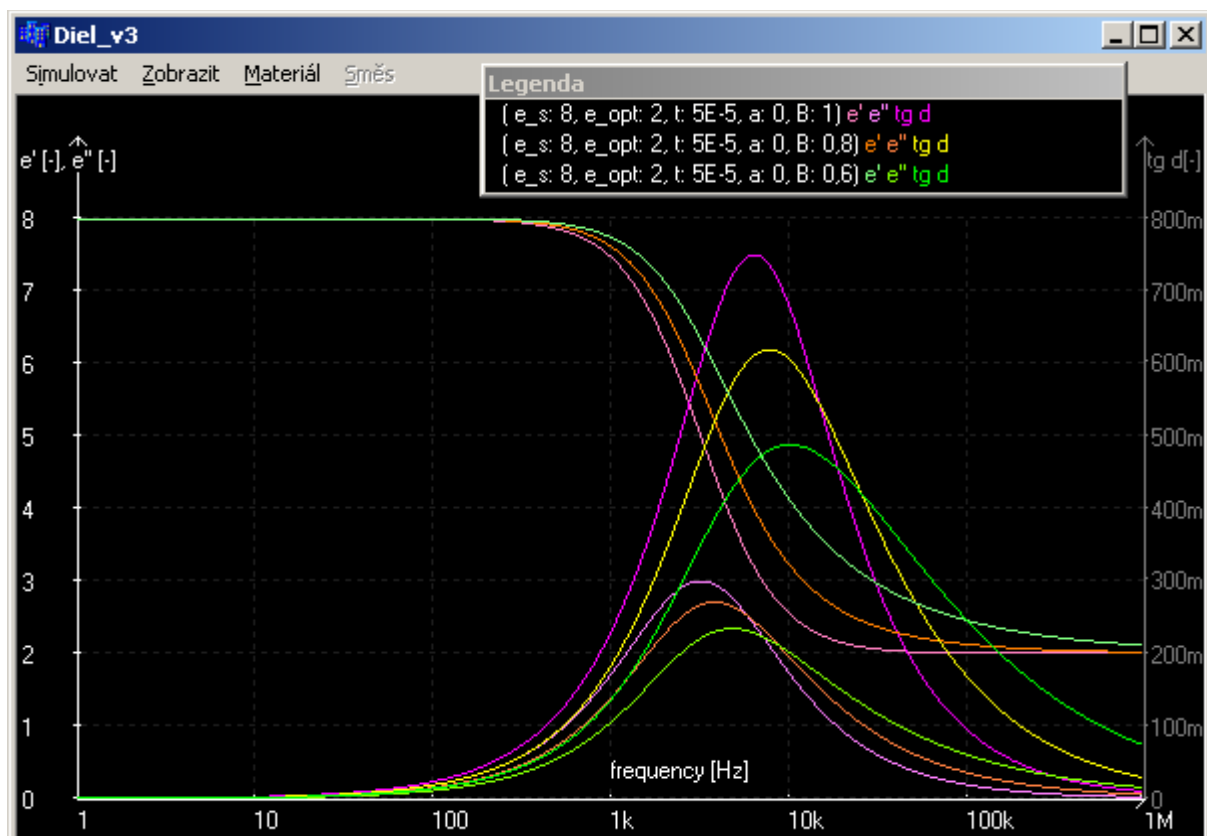
Materiál můžeme vybrat z databáze nebo zadat hodnoty manuálně. Při ručním zadávání hodnot si materiál můžeme pro snadnější orientaci také pojmenovat vepsáním jména do horního políčka. Jednotlivé položky mají tento význam: ε_s (-) je statická permitivita (při $\omega \rightarrow 0$), ε_∞ (-) je optická permitivita (při $\omega \rightarrow \infty$), τ (s) je relaxační doba, α (-) je distribuční parametr (frekvenčně nezávislý, určující šířku distribuce relaxačních dob) a β (-) je činitel, který charakterizuje asymetrii. V dolní části okna vybíráme, jaké křivky chceme, aby se u materiálu zobrazily a vybíráme jejich barvu.

2.2.2 Debyeho funkce s parametry α a β

Jestliže při vytváření nebo editaci údajů o materiálu nastavíme parametr α na hodnotu jinou než 0 a parametr β na hodnotu jinou než 1, můžeme pozorovat vliv těchto parametrů na průběhy relativní permitivity ε' , ztrátového čísla ε'' a ztrátového činitele $\tan \delta$.



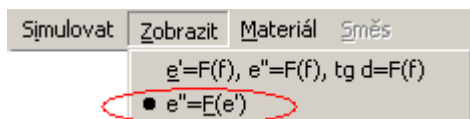
Obr. 2.6 Vliv parametru α na průběh dielektrických veličin



Obr. 2.7 Vliv parametru β na průběh dielektrických veličin

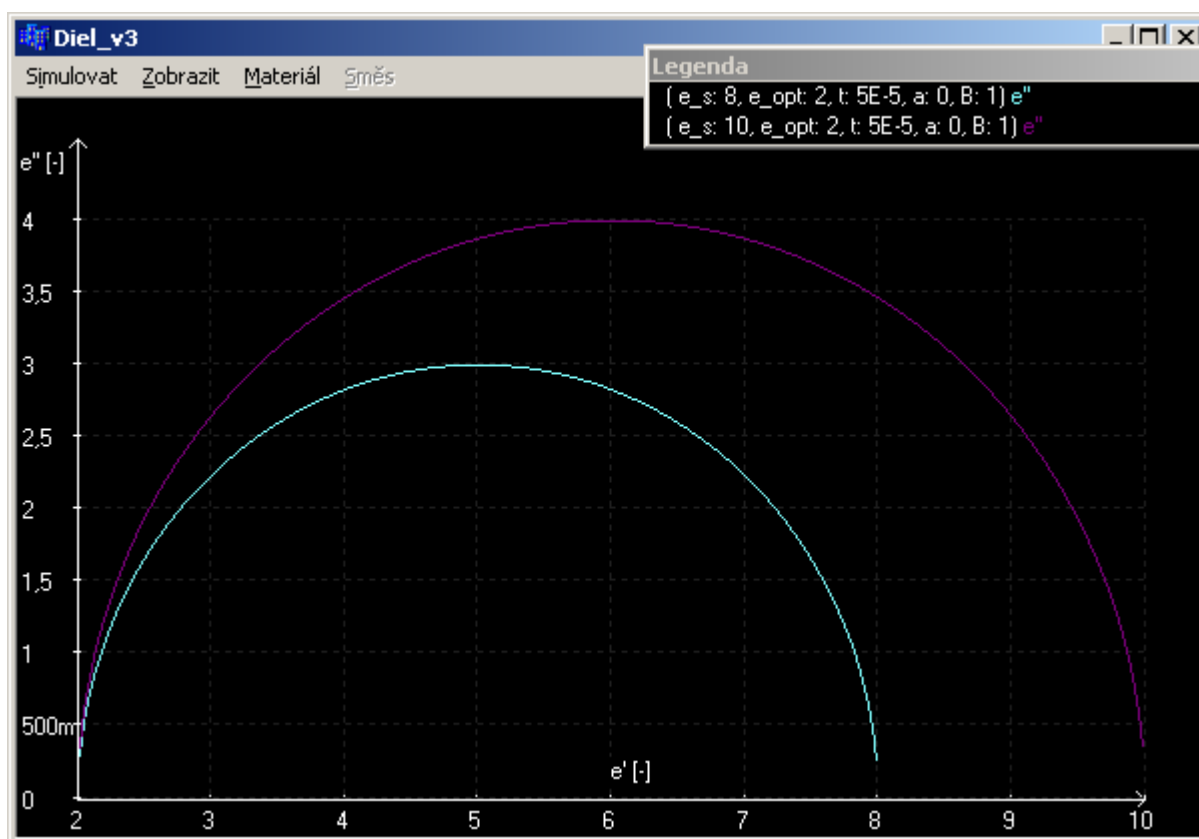
2.2.3 Coleho – Coleho kruhový diagram

Pro zobrazení Coleho-Coleho kruhového diagramu zvolíme v menu položku *Zobrazit* → $e'' = F(e')$:



Obr. 2.8 Volba zobrazení závislosti

Na následujícím obrázku vidíme příklad Coleho-Coleho kruhového diagramu:

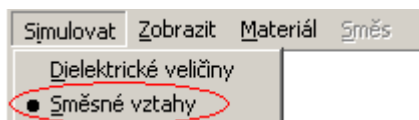


Obr. 2.9 Zobrazení Coleho-Coleho kruhového diagramu

Osu ϵ'' je možno v menu *Nastavení* protáhnout do nuly.

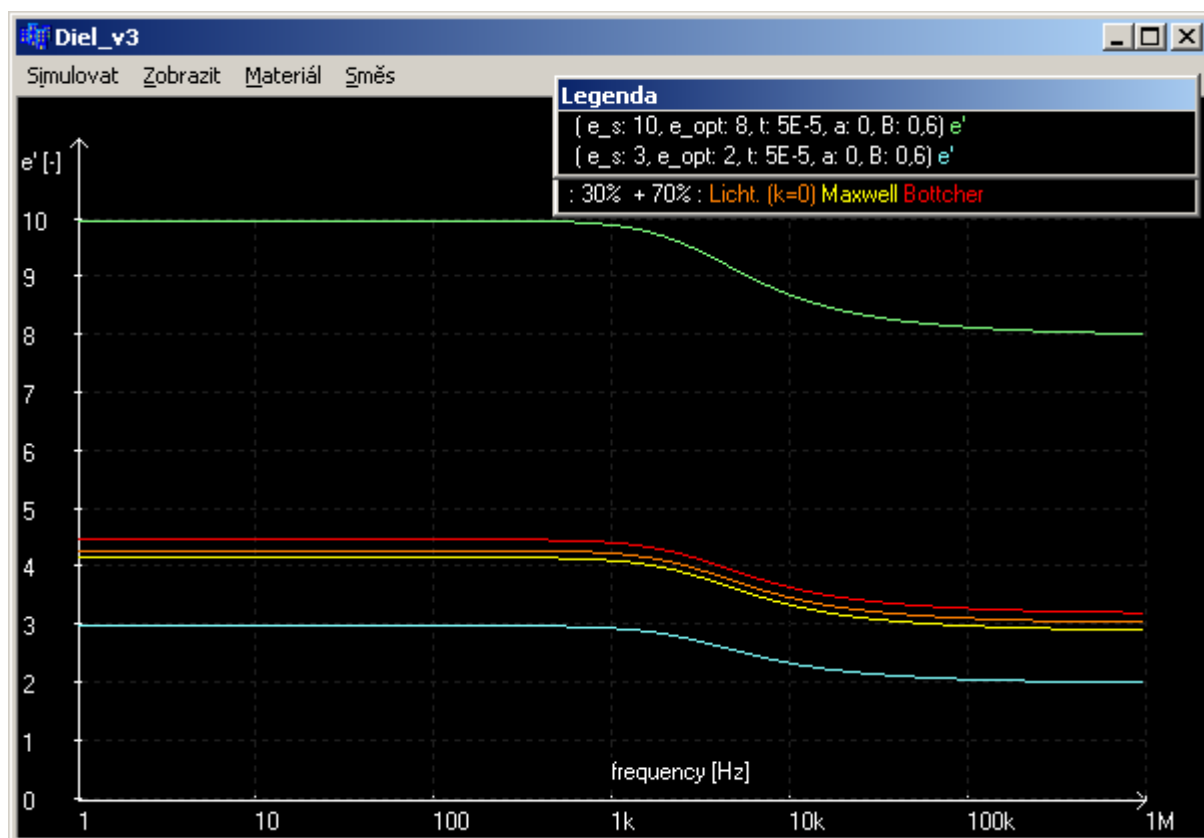
2.2.4 Směsné vztahy

V hlavním menu vybereme *Simulovat* → *Směsné vztahy*:



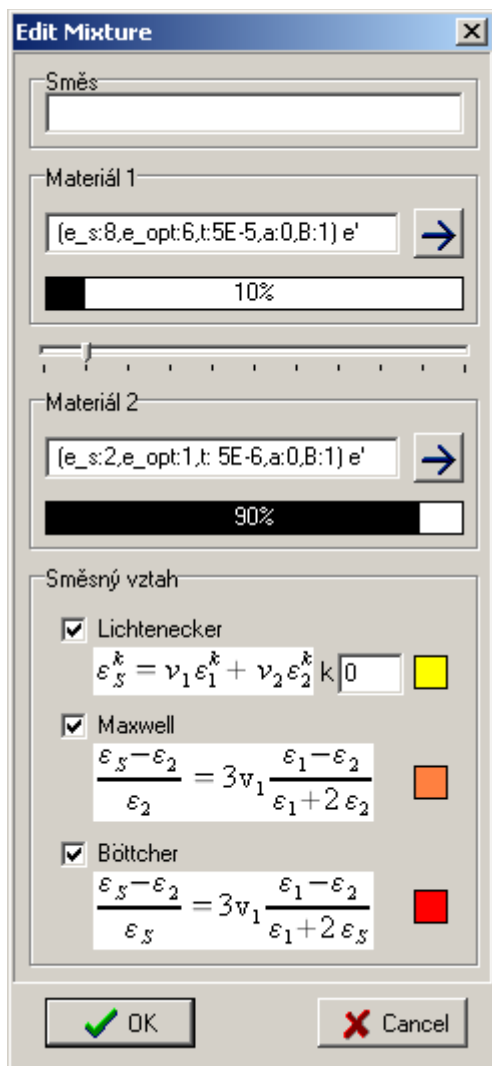
Obr. 2.10 Výběr simulace

Na základě využití směsných vztahů můžeme zobrazovat pouze frekvenční závislost relativní permitivity $\epsilon' = F(f)$. Příklad výstupu simulace můžeme vidět na následujícím obrázku:



Obr. 2.11 Zobrazení průběhu relativní permitivity složené soustavy v závislosti na frekvenci

Chceme-li simulovat frekvenční závislost relativní permitivity dvousložkové složené soustavy, je nutné mít už vytvořené alespoň dva materiály (*Materiál* → *Přidat*). Vytvoření složené soustavy provedeme příkazem *Směs* → *Přidat*. Uvidíme okno jako na následujícím obrázku (obr. 2.12). Po kliknutí na šipku u materiálu 1 nebo 2 se nám otevře okno se seznamem všech vytvořených materiálů, z kterých jeden vybereme. Materiál 1 představuje dispergované částice a materiál 2 matriční prostředí. Záměna materiálů je možná pouze u soustav statistického typu. Posuvníkem mezi materiály vybereme objemový obsah jednotlivých složek ve směsi. V dolní části okna vybereme, jaké směsné vztahy chceme na tuto soustavu aplikovat a vybereme barvy křivek. U Lichteneckera směsného vztahu můžeme měnit hodnotu empirického parametru k , která se pohybuje v rozmezí $<-1; 1>$.



Obr. 2.12 Okno na přidání nebo editaci směsí (složených soustav)

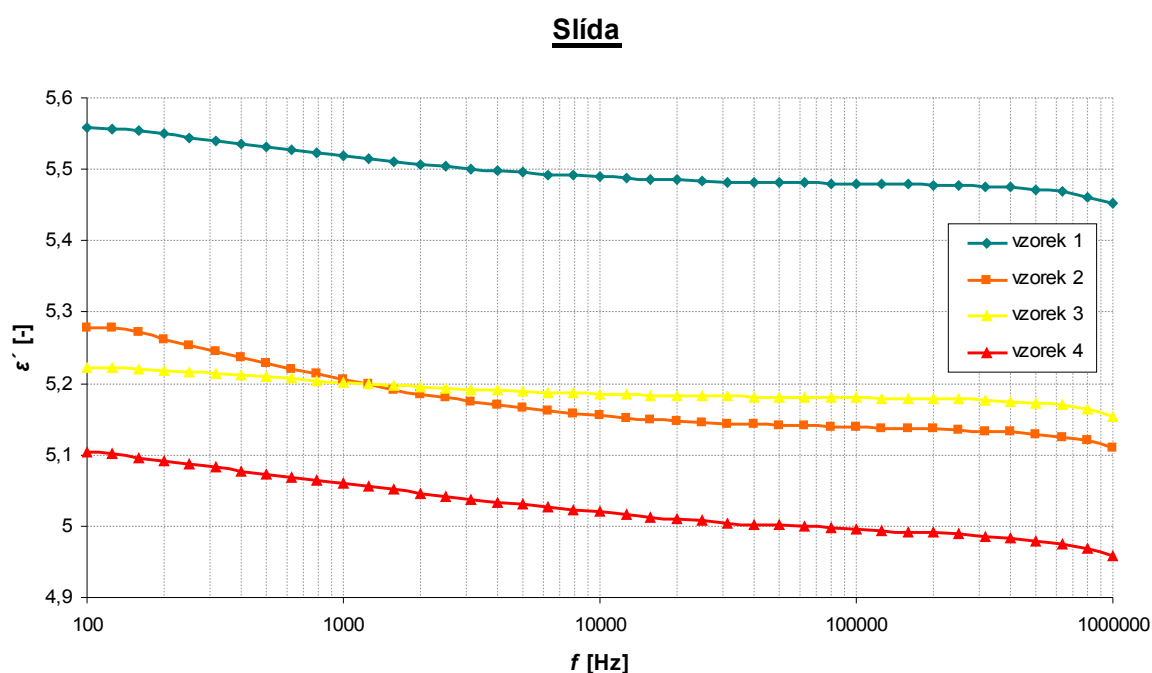
Přes položku menu *Směs* → *Editovat* se dostaneme do editačního menu směsí, ve kterém můžeme přidat další soustavu (tl. *Přidat*), editovat již existující soustavu (tl. *Editovat*, nebo dvojklikem na požadovanou položku), smazat libovolnou soustavu (tl. *Smazat*) a měnit pořadí soustav v seznamu. Pořadí soustav v seznamu určuje pořadí, ve kterém se budou křivky vykreslovat na plochu.

2.3 Ověření na praktickém příkladu

Ověření je provedeno na dvousložkové složené soustavě laku a slídy a na soustavě polypropylenu plněného vápencem CaCO_3 .

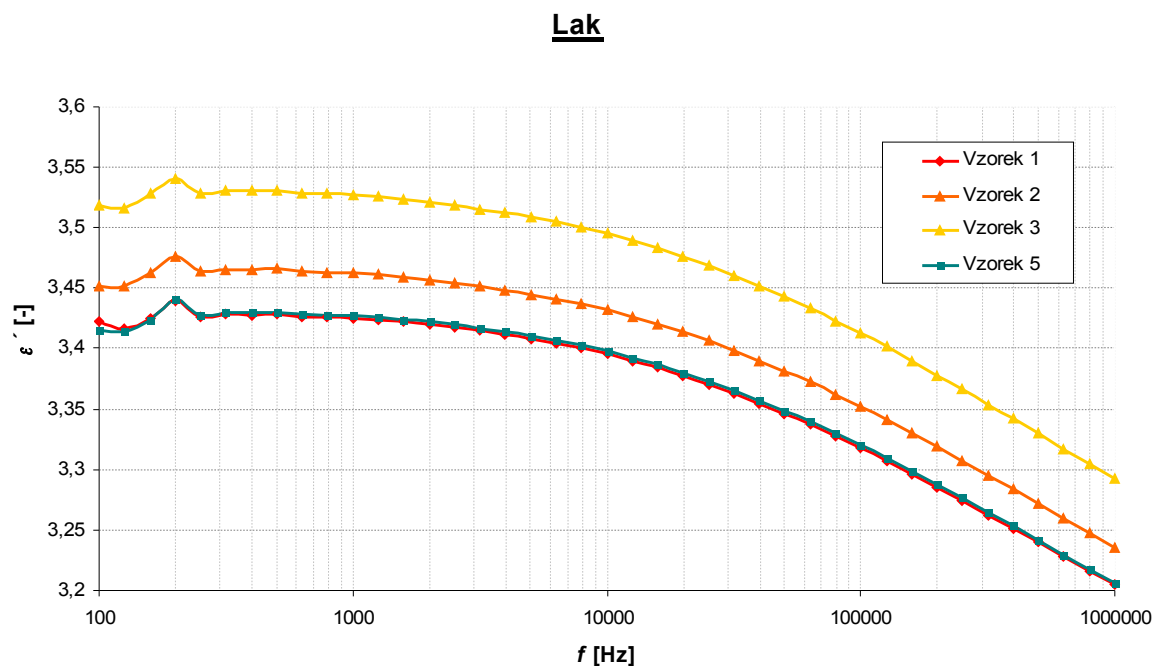
2.3.1 Naměřené hodnoty složené soustavy laku a slídy

Na obr. 2.13 můžeme vidět naměřené hodnoty čisté slídy. Měření bylo provedeno na 4 vybraných vzorcích čisté slídy. Vidíme, že relativní permitivita je v rozmezí 5,1 až 5,55 pro nízké frekvence a v rozmezí 4,95 až 5,45 pro vysoké frekvence. Hodnoty permitivity se mohou lišit například kvůli nerovnosti povrchu vzorků.



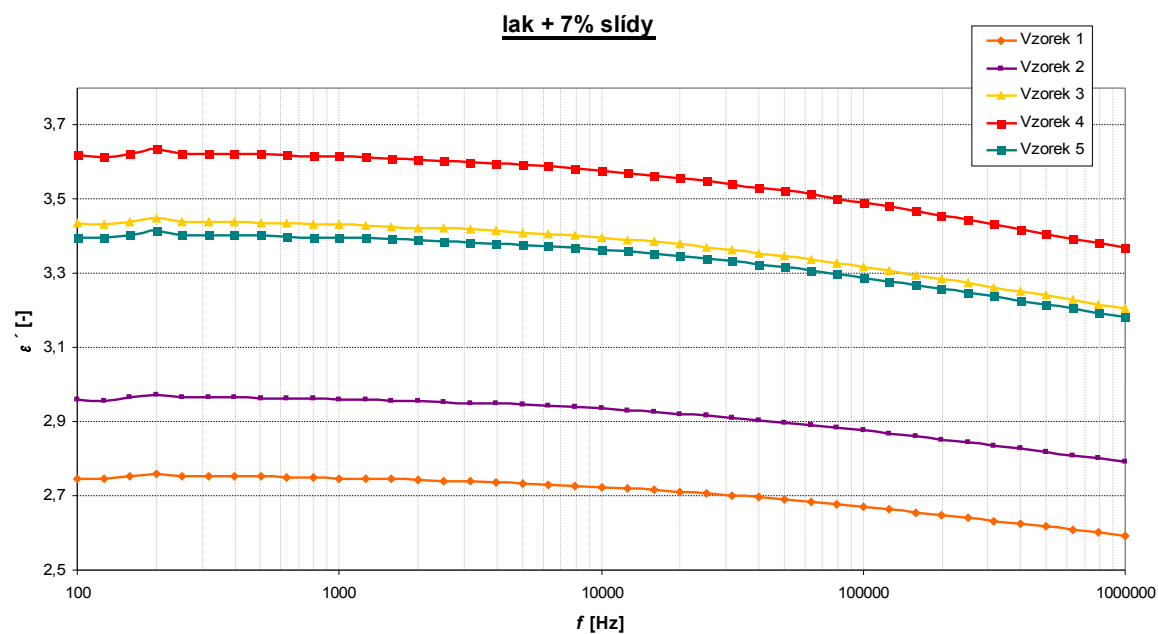
Obr. 2.13 Závislost relativní permitivity slídy na frekvenci

Na obr. 2.14 můžeme vidět naměřené hodnoty čistého laku. Měření frekvenční závislosti relativní permitivity bylo provedeno na čtyřech vybraných vzorcích čistého laku. Na obr. 2.14 vidíme, že se relativní permitivita laku pohybuje v docela úzkém rozmezí 3,42 až 3,52 pro nízké frekvence a v rozmezí 3,2 až 3,3 pro vysoké frekvence.



Obr. 2.14 Závislost relativní permitivity laku na frekvenci

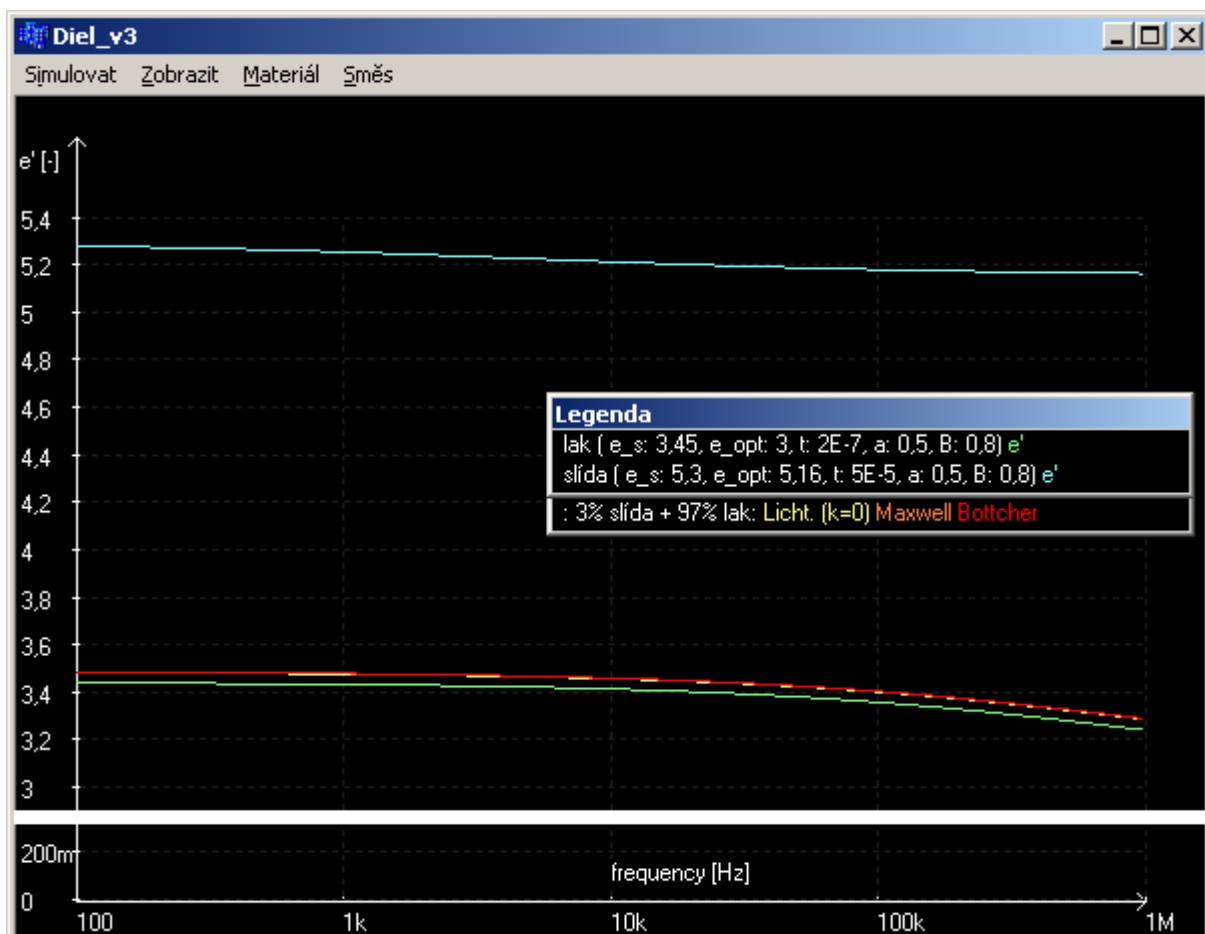
Měření permitivity složené soustavy laku a 7 % slídy jsem provedl na pěti vzorcích a na obr. 2.15 vidíme, jak rozdílná je výsledná relativní permitivita výsledné soustavy.



Obr. 2.15 Závislost relativní permitivity směsi laku a slídy na frekvenci

2.3.2 Porovnání simulace s měřením složené soustavy laku a slídy

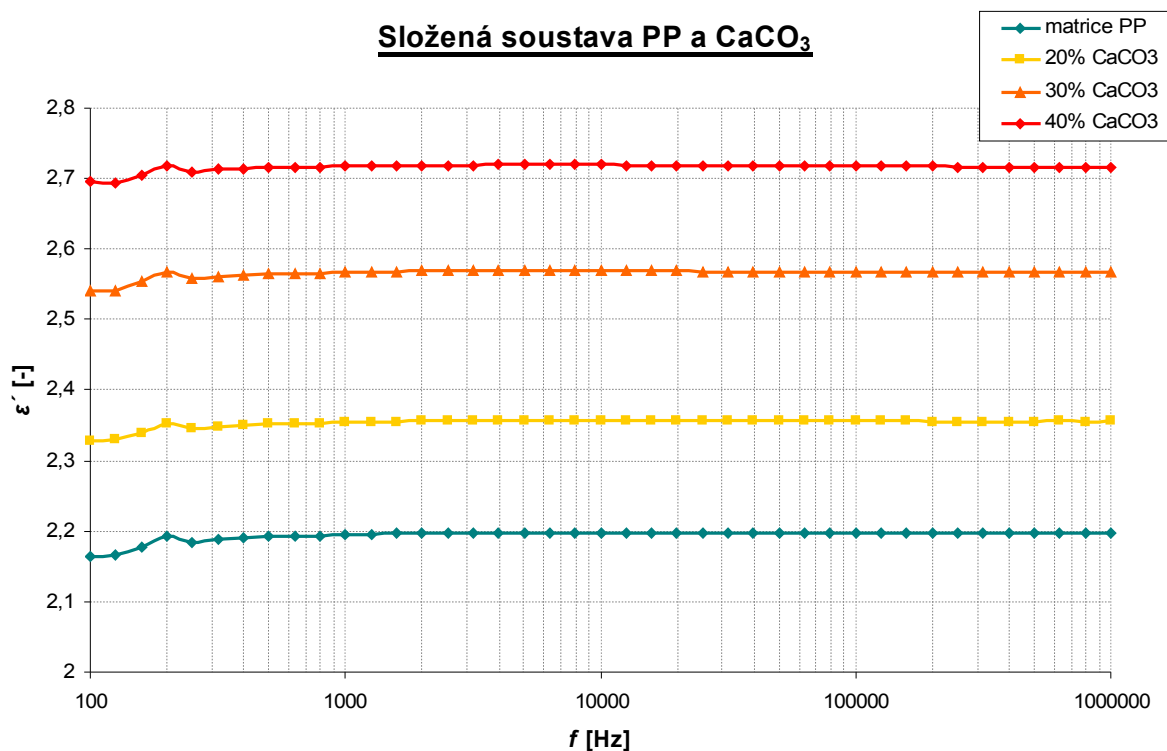
Porovnání je provedeno na dvousložkové složené soustavě laku s dispergovanou slídou o různé hrubosti. Nejdříve bylo nutné přepočítat hmotnostní podíl slídy a laku na podíl objemový. Z rozměrů a váhy vzorku čistého laku jsme vypočítali jeho hustotu na 1200 kgm^{-3} . Objemový podíl slídy poté vyšel průměrně asi 2,5 %.



Obr. 2.16 Závislost relativní permitivity složené soustavy laku a slídy

Na obr. 2.16 vidíme průběhy permitivity získané modelováním v programu. Podíl slídy v soustavě je velmi malý a podle teoretických vztahů by měl ovlivnit velikost permitivity jenom nepatrně. Ovšem hodnoty naměřené permitivity se pohybovaly v rozmezí od 2,7 do 3,6. Dá se předpokládat, že vliv na změřené hodnoty mohla mít nedokonalá rovinnost povrchu vzorků. Jak můžeme vidět na obr. 2.16, průběhy modelované podle různých vztahů vyšly téměř shodně.

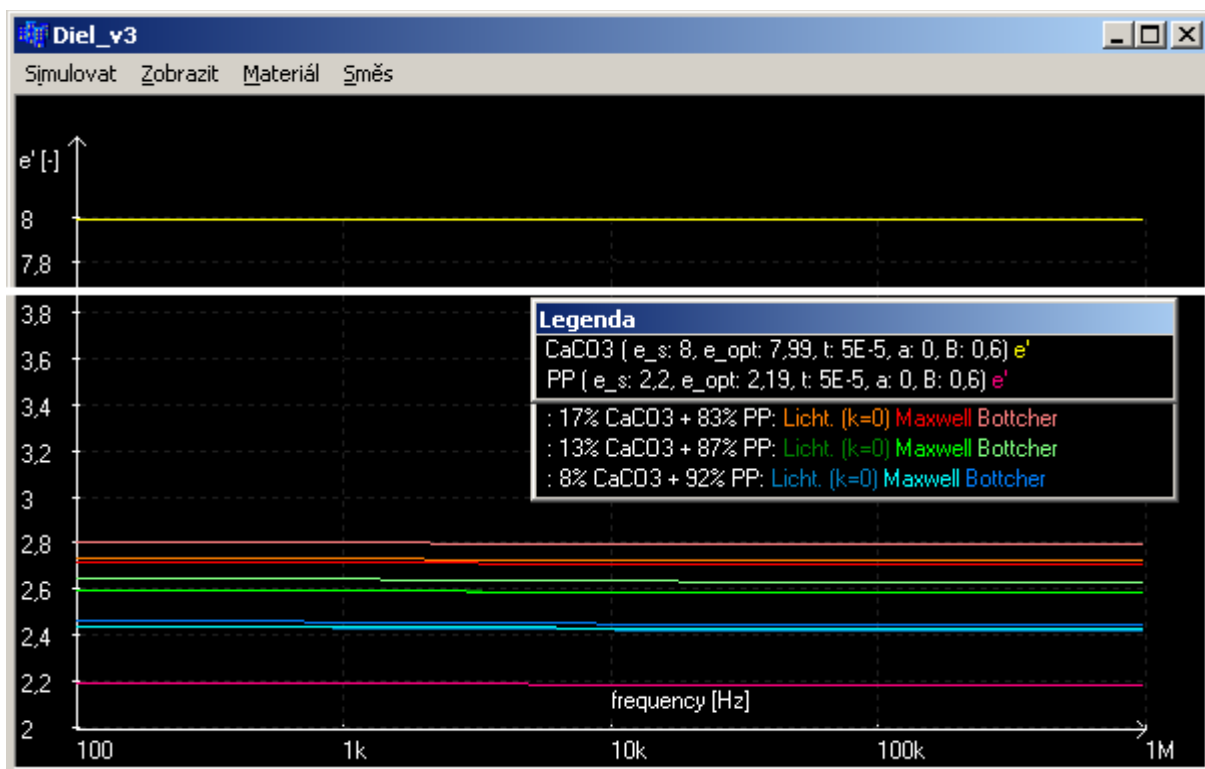
2.3.3 Naměřené hodnoty složené soustavy polypropylenu plněného vápencem



Obr. 2.17 Závislost relativní permitivity složené soustavy polypropylenu plněného vápencem

2.3.4 Porovnání simulace s měřením složené soustavy polypropylenu plněného vápencem

Nejdříve bylo nutné přepočítat hmotnostní podíl obsaženého vápence na podíl objemový pomocí známé hustoty vápence, která je 2930 kgm^{-3} . 40 % hmotnostních odpovídá 18,00 % objemových, 30 % hmotnostních odpovídá 12,47 % objemových a 20 % hmotnostních odpovídá 7,63 % objemových.



Obr. 2.18 Závislost relativní permitivity složené soustavy polypropylenu plněného vápencem

Na obr. 2.18 vidíme průběh získaný modelováním v programu. Můžeme si všimnout, že změřeným hodnotám relativní permitivity složené soustavy se nejvíce blíží hodnoty namodelované pomocí Maxwellova směsného vztahu, ale téměř shodně vychází také průběh namodelovaný pomocí Lichteneckerova směsného vztahu. Největší odchylku od naměřených hodnot vidíme u Böttcherova směsného vztahu, dá se říci, že to odpovídá i teoretickým předpokladům, protože tento směsný vztah je vhodný spíše pro složené soustavy o větším podílu dispergovaných částic.

3 Závěr

V předložené práci je vysvětleno, co to jsou dielektrika, permitivita, vytvořen přehled používaných směsných vztahů a popsáno ovládání vytvořeného programu.

Hlavním cílem práce bylo vytvoření programu využitelného při výuce. Zadání se podařilo splnit, vytvořené softwarové vybavení může využito přímo ve výukovém procesu i při přípravě studentů formou samostatného studia. Program slouží k simulaci průběhů relativní permitivity, ztrátového činitele a ztrátového čísla v závislosti na frekvenci podle Debyeho teorie. Lze modelovat také průběhy závislosti mezi složkami komplexní permitivity podle Coleho – Coleho. U složených soustav je možné simulovat průběh relativní permitivity v závislosti na frekvenci podle Maxwelllova, Böttcherova a Lichteneckerova směsného vztahu. Je ovšem nutné si uvědomit, že vypočítané průběhy budou ve skutečnosti platit pouze při frekvencích ležících mimo relaxační oblast frekvenční disperze. Součástí programu je databáze materiálů, kterou je možné jednoduše rozšiřovat, ovšem najít potřebné parametry pro jednotlivé materiály není vůbec jednoduché.

V praktické části bylo ještě provedeno i ověření na praktickém příkladu dvousložkové složené soustavy a byly porovnány výsledky získané měřením a modelováním v programu.

4 Seznam použité literatury

- [1] Jirák J., „Materiály a technická dokumentace, Část Materiály v elektrotechnice“. VUT Brno.
- [2] Kazelle J., „Elektrotechnické materiály a výrobní procesy“. VUT Brno.
- [3] Mentlík V., „Dielektrické prvky a systémy“. BEN – technická literatura.

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Autor: Jiří Matoušek

Název závěrečné práce: Počítačové modelování směsných vztahů složených soustav

Název závěrečné práce ENG: Computer modelling of mixture formulas of composite materials

Anotace závěrečné práce: Předkládaná práce se zabývá modelováním průběhů dielektrických veličin a aplikací směsných vztahů pro řešení složených soustav v závislosti na frekvenci. Teoretická část se zabývá fyzikou dielektrik a charakteristikou a popisem složených soustav a její součástí je přehled základních směsných vztahů. Součástí práce je program, využitelný při výuce, umožňující modelování průběhů permitivity, ztrátového činitele a ztrátového čísla v závislosti na frekvenci a Coleho-Coleho diagramu materiálu; u směsí potom simulaci Maxwellova, Böttcherova a Lichteneckerova směsného vztahu.

Anotace závěrečné práce ENG: Submitted work engage in modelling of progressions of dielectric variables and application of mixture formulas for solution of composite materials in dependency on frequency. Theoretical part engage in theory of dielectric materials and composite materials and contains summary of basic mixture formulas. A part of work is programm which can be used in education. It allows modelling of permitivity, loss factor and loss number in dependency on frequency and Cole-Cole circle diagram in materials. In mixtures modelling of Maxwell's, Böttcher's and Lichtenecker's mixture formulas.

Klíčová slova: Dielektrika, permitivita, složené soustavy, směsné vztahy, Maxwell, Lichtenecker, Böttcher

Klíčová slova ENG: Dielectrics, permitivity, composite materials, mixture formulas, Maxwell, Lichtenecker, Böttcher

Typ závěrečné práce: bakalářská práce

Datový formát elektronické verze: pdf

Jazyk závěrečné práce: čeština

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Přidělovaný titul: Bc.

Vedoucí závěrečné práce: Ing. Zdenka Rozsivalová

Škola: Vysoké učení technické v Brně

Fakulta: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav / ateliér: Ústav elektrotechnologie

Studijní program: Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika

Studijní obor: Mikroelektronika a technologie